

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-06>

УДК 621.039.5:536.7

EDN NYUWBH

Оригинальная статья / Original paper



**Моделирование термодинамических процессов в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200**

**Г.А. Башкиров<sup>1</sup> ✉, А.Д. Данилов<sup>1</sup>, Н.В. Карандеева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский Государственный Технический Университет, г. Воронеж,  
Воронежская область, Российская Федерация

<sup>2</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»  
г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

✉ [bashkirovga@oiate.ru](mailto:bashkirovga@oiate.ru)

**Аннотация.** В статье произведена оценка влияния температуры охлаждающей воды на давление в главных конденсаторах паротурбинной установки К-1200-6.8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200 на примере энергоблока №1 НВАЭС-2. По результатам исследования создана имитационная теплогидравлическая модель в среде динамического моделирования технических систем SimInTech, учитывающая влияние процесса тепломасообмена в башенной испарительной градирне и тепловой баланс конденсатора турбины. Модель позволяет произвести количественную оценку влияния температуры воздуха на величину вакуума в конденсаторе турбоустановки. По полученным данным построены графики зависимости давления в конденсаторе от температуры основной охлаждающей воды, с помощью которых можно спрогнозировать момент наступления эксплуатационных пределов. Данная оценка особенно актуальна для атомных электростанций, построенных в южной части центральной России, а также для зарубежных проектов ГК Росатом. Опыт эксплуатации систем охлаждения, особенно с жесткой водой, показывает, что соблюдение требований чистоты внутрикорпусных устройств является важной мерой в поддержании водно-химического режима и оптимизации режимов работы градирни, поэтому в описании модели введен параметр загрязнения. В задачи данного исследования входила оценка влияния только внешних условий окружающей среды, а именно температуры окружающего воздуха, без учета процесса образования отложений в системе. Практическая значимость работы заключается в анализе эксплуатационных данных для обоснования необходимости корректирующих мер и модернизационных решений, которые могут быть использованы работниками АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» для повышения эффективности работы системы оборотного технического водоснабжения с башенными испарительными градирнями.

**Ключевые слова:** Башенная испарительная градирня, конденсатор, тепломассообмен, уравнение Меркеля, SimInTech, математическая модель, АЭС

**Для цитирования:** Башкиров Г.А., Данилов А.Д., Карандеева Н.В. Моделирование термодинамических процессов в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):57-66. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-06>

**For citation:** Bashkirov G.A., Danilov A.D., Karandeeva N.V. Modeling of thermodynamic processes in the main cooling water system of the VVER-1200 power unit. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):57-66. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-06>

**Modeling of thermodynamic processes in the main cooling water system of the VVER-1200 power unit**

**Georgy A. Bashkirov<sup>1</sup> ✉, Alexander D. Danilov<sup>1</sup>, Natalya V. Karandeeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation

<sup>2</sup>Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC,  
Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation

✉ [bashkirovga@oiate.ru](mailto:bashkirovga@oiate.ru)

**Abstract.** The article evaluates the effect of the cooling water temperature on the pressure in the main condensers of a steam turbine installation C-1200-6.8/50 for nuclear power plants with a VVER-1200 reactor. Based on the results of the study, a simulated thermohydraulic model is created in the dynamic modeling environment of SimInTech technical systems, taking into account the influence of the heat and mass transfer process in the tower evaporative cooling tower and the thermal balance of the turbine condenser. The model makes it possible to quantify the effect of air temperature on the vacuum in the turbine condenser. Based on the data obtained, graphs of the dependence of the pressure in the condenser on the temperature of the main cooling water are constructed, with the help of which it is possible to predict the moment of the onset of operational limits. This assessment is especially relevant for nuclear power plants built in the southern part of central Russia, as well as for foreign projects of Rosatom State Corporation. The experience of operating cooling systems, especially with hard water, shows that compliance with the cleanliness requirements of internal devices is an important measure in maintaining the water-chemical regime and optimizing the operating modes of the cooling tower, therefore, the pollution parameter is introduced in the model description. The objectives of this study are to assess the influence of only external environmental conditions, namely ambient air temperature, without taking into account the process of sediment formation in the system. The practical significance of the work lies in the analysis of operational data to substantiate the need for corrective measures and modernization solutions that can be used by employees of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant to improve the efficiency of the circulating water supply system with tower evaporative cooling towers.

**Keywords:** tower evaporative cooling tower, condenser, heat and mass transfer, Merkel equation, SimInTech, mathematical model, NPP

## Введение

Строительство новых мощных блоков с ВВЭР-1200 предъявляет высокие требования к оборудованию АЭС в плане заявленной выработки электроэнергии. Если рассматривать второй контур энергоблока АЭС, как термодинамическую систему, то выбор начальных параметров будет ограничен физическими основами реакторной установки ВВЭР, которые не позволяют повышать давление и температуру свежего пара выше установленных требований. Оптимальные параметры в конце цикла паротурбинной установки будут зависеть от вакуума в конденсаторе турбины, который зависит от температуры основной охлаждающей воды. В контур оборотного технического водоснабжения Нововоронежской АЭС-2 с реактором ВВЭР-1200 входит башенная испарительная градирня, которая предназначена для охлаждения нагретой охлаждающей воды в конденсаторе, обеспечивая оптимальную температуру и безопасную эксплуатацию оборудования. Чем эффективнее осуществляется процесс теплообмена в градирне, тем более оптимально давление в конденсаторе, которое положительно влияет на увеличение располагаемого теплоперепада в паротурбинной установке, что повышает КПД энергоблока АЭС и выработку электроэнергии в энергосистему в целом [1].

Целью исследования явилось определение

критических параметров эксплуатации, при которых происходит разгрузка энергоблока без учета влияния химии воды. Опыт эксплуатации больших систем охлаждения, особенно с жесткой водой, показывает, что соблюдение требований чистоты внутрикорпусных устройств (ВКУ) является важной мерой в поддержании водно-химического режима и оптимизации режимов работы градирни, поэтому в описании модели введен параметр загрязнения [2]. В задачи данного исследования входила оценка влияния только внешних условий окружающей среды, а именно температуры окружающего воздуха, без учета процесса образования отложений в системе [3]. Для достижения поставленной цели использован метод математического моделирования на базе программного комплекса SimInTech.

В статье приведена математическая модель системы основной охлаждающей воды с условно чистой градирней для расчета изменения давления в конденсаторе турбины К-1200-6,8/50 в наиболее жаркий период года в зависимости от температуры атмосферного воздуха.

## Материалы и методы

В состав оборотной системы охлаждения Нововоронежской АЭС-2 входят циркуляционные насосы охлаждения конденсатора и насосы технической воды для охлаждения

неответственных потребителей машинного зала. К системе оборотного водоснабжения относится непосредственно сама башенная испарительная градирня с водоотводящим каналом и здание блочной насосной станции, которая включает в себя основное и вспомогательное оборудование циркуляционных насосов [4].

При температуре охлаждающей воды от 12 до 31°C обеспечивается достаточная глубина вакуума для проектного режима работы конденсатора. Ежегодно с мая по сентябрь температура охлаждающей воды Нововоронежской АЭС превышает проектное значение +31°C, что влечет за собой ограничение мощности.

Зависимость величины разгрузки (изменение мощности) турбогенератора [5] от температуры охлаждающей воды представлено на рисунке 1.

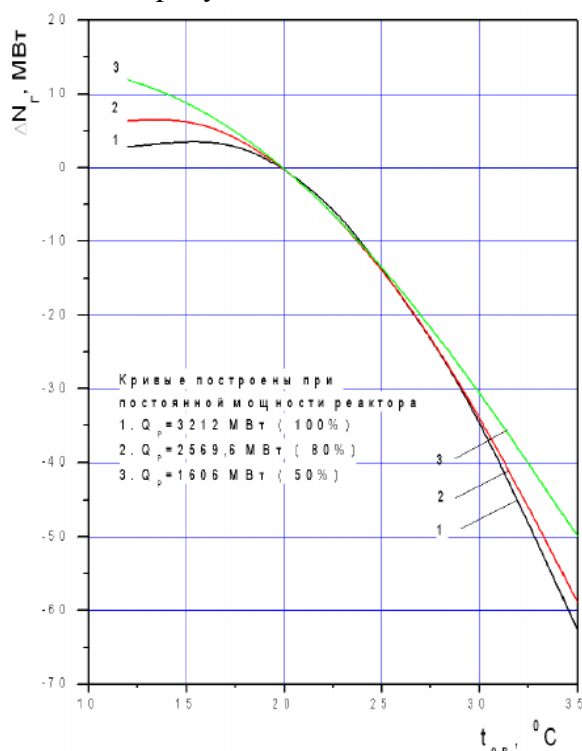


Рисунок 1. Изменение мощности в зависимости от температуры охлаждающей воды

Figure 1. Power change depending on the cooling water temperature

SimInTech – программная платформа для разработки математических моделей, алгоритмов управления, мнемосхем и видеокладов, обладающая возможностью автоматической генерации кода для программируемых контроллеров. Программное обеспечение

SimInTech является модульным программным обеспечением, в составе которого входит несколько математических ядер, база данных, графическая среда разработки, кодогенераторы и другие модули. В данной статье проводится работа со средой разработки «модель общего вида», которая включает в себя набор блоков-операторов, таких как константа функции, программатор, база сигналов, а также блок-оператор внутреннего программного кода, который позволяет выполнять создание собственных блоков-операторов для выполнения необходимых задач.

В качестве входных параметров в математической модели зададим постоянным расход охлаждающей воды на вход в конденсатор турбины, теплоту, отводимую от конденсатора, уровень загрязнения внутрикорпусных устройств башенной градирни. Состояние температуры окружающего воздуха зададим в виде блока-оператора «синусоида», который будет имитировать изменение окружающей среды.

Для описания процесса теплообмена в блоке-задатчике внутреннего языка программирования SimInTech воспользуемся уравнением Меркеля (1), описывающим изменение температуры по высоте оросителя в башенной испарительной градирне:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{-\beta_{xa} \cdot (h'' - h)}{c_{\omega} \cdot q_{\omega}} \quad (1)$$

где  $T$  – температура воды, °C;

$z$  – высота оросителя, м;

$\beta_x \alpha$  – объемный коэффициент массопередачи, кг/(м<sup>3</sup>·с);

$h''$  – энтальпия насыщенного влажного воздуха при определенной температуре воды, Дж/кг;

$h$  – энтальпия влажного воздуха в ядре потока, Дж/кг;

$c_{\omega}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг;

$q_{\omega}$  – плотность орошения, кг/(м<sup>2</sup>·с).

При внедрении в математическую модель уравнения Меркеля важно учитывать зависимость плотности орошения от расхода охлаждающей воды и площадь орошения, которая будет зависеть от типа оросителя, его формы, а также объема пакетов-оросителей в одном слое башенной испари-

тельной градирне. Данная зависимость указана в формуле (2):

$$q_{\omega} = \frac{G_{\omega}}{F_{op}}, \quad (2)$$

где  $G_{\omega}$  – массовый расход охлаждающей воды, кг/с;

$F_{op}$  – площадь орошения, м<sup>2</sup>.

Для повышения точности вычислений термодинамических процессов в башенной градирне используем для численного решения уравнения (3) дискретизацию по высоте оросителя  $H$  с числом слоев  $N$ :

$$T_{i+1} = T_i - \frac{\beta_{xa} \cdot (h'' - h)}{c_{\omega} \cdot q_{\omega}} \cdot \Delta z, i = 1 \dots N, \quad (3)$$

где  $T_i = T_{in}$  – температура воды на входе в градирню (после конденсатора) °С;

$T_{out} = T_{N+1}$  – температура охлажденной воды на выходе из градирни.

Важно учитывать в формуле (3) зависимость по числу и высоте слоев (4), представленную в виде:

$$\Delta z = \frac{H}{N}. \quad (4)$$

Для учета карбонатных отложений введем коэффициент загрязнения  $K_{foul}$ , снижающий эффективный коэффициент массопередачи и принимающий значения: от 0 – чистая градирня, до 1 – предельно загрязненная. Зависимость коэффициента массопередачи от степени загрязнения градирни описывается уравнением (5):

$$\beta_{xa} = (\beta_{xa})_0 \cdot (1 - K_{foul}), \quad (5)$$

где  $(\beta_x \alpha)_0$  – коэффициенты, вычисляемые для чистой водораспределительной системы градирни.

Для составления уравнения теплового баланса в конденсаторе воспользуемся формулой расчета степени нагрева циркуляционной воды  $\Delta T_{cond}$  (6):

$$\Delta T_{cond} = \frac{Q_k \cdot 10^6}{G_{\omega} \cdot c_{\omega}}, \quad (6)$$

где  $Q_k$  – тепловая нагрузка конденсатора, МВт;  
 $G_{\omega}$  – расход циркуляционной воды, т/ч;  
 $c_{\omega}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг;

$T_{in}$  – температура воды на выходе из конденсатора, °С;

$T_{out}$  – температура охлажденной воды на выходе из градирни, °С;

$\Delta T_{cond}$  – изменение температуры циркуляционной воды, °С.

Зависимость температуры воды на выходе из конденсатора<sup>1</sup> и температуры охлажденной воды на выходе из градирни можно представить с помощью изменения температуры циркуляционной воды (7):

$$T_{in} = T_{out} + \Delta T_{cond}. \quad (7)$$

Значения температуры воздуха рассчитаем в виде гармонического сигнала с постоянной составляющей (8):

$$T_{air(t)} = T_{avg} + A \sin \frac{2\pi t}{P}, \quad (8)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент;

$T_{avg}$  – среднесуточная температура, °С;

$P$  – период гармонических колебаний.

Среднюю температуру воды в конденсаторе  $T_{sat}$  (температура насыщения) рассчитаем по формуле (9):

$$T_{sat} = T_{out} + \frac{\Delta T_{cond}}{2}. \quad (9)$$

Давление в конденсаторе  $P_k$  опишем линейной аппроксимацией давлений в рабочем диапазоне (10):

$$P_k = P_0 + k_p(T_{sat} - 25), \quad (10)$$

где  $P_0$  – давление при температуре насыщения 25 °С = 4,0 кПа;

$k_p$  – прирост давления на 1 °С = =0,57 кПа/°С.

При составлении и расчете математической модели энтальпию воздуха на входе в башенную испарительную градирню вычислим при помощи зависимости (11):

<sup>1</sup> Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2019. – 120 с. – Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_012904205/?ysclid=mowrvq8zt7967763358](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012904205/?ysclid=mowrvq8zt7967763358) (дата обращения: 14.01.2026).

$$h_{air} = (k_{h1} \cdot T_{air} + k_{h0}) \cdot 1000, \quad (11)$$

где  $h_{air}$  – энтальпия воздуха на входе, Дж/кг;  
 $k_{h1}$  – коэффициент энтальпии = 1,88 кДж/(кг·°C);

$k_{h0}$  – постоянная энтальпии = 2500 кДж/кг;

$T_{air}$  – температура наружного воздуха, °C.

Используемая в модели упрощенная линейная зависимость энтальпии насыщенного воздуха от температуры была откалибрована по табличным данным для диапазона температур  $T = 20 \div 60$  °C. Диапазон калибровки был выбран:  $k_{h1}$  от 1,5 до 2,5 кДж/(кг·°C),  $k_{h0}$  от 2000 до 3000 кДж/кг. Основным критериям являлась минимизация среднеквадратичной ошибки между табличными значениями энтальпии и линейной аппроксимацией. Полученные значения:  $k_{h1} = 1,88$  кДж/(кг·°C),  $k_{h0} = 2500$  кДж/кг. Ошибка аппроксимации в рабочем диапазоне (30 ÷ 50 °C) не превышает 2,5 %.

Для разработки математической модели с последующей верификацией зададим конструктивные (геометрические) параметры, режимные параметры, калибруемые параметры, идентифицируемые по экспериментальным данным.

На основе проектной документации башенной градирни зададим следующие конструктивные параметры:

- высота оросителя  $H = 1,35$  м;
- число слоев оросителя  $N = 10$ ;
- площадь орошения = 12335,495 м<sup>2</sup>;
- теплоемкость воды  $c_w = 4186$  Дж/(кг·°C).

Зададим режимные параметры, которые влияют от условия работы энергоблока АЭС и могут меняться в расчетах в зависимости от времени года. В качестве начальных условий выберем нагрузку энергоблока 100% от  $N_{ном}$ , температуру наружного воздуха в летний режим работы по средним данным за последние 5 лет:

– расход охлаждающей воды  $G_w = 148000$  т/ч;

– тепловая нагрузка конденсатора  $Q_k = 2000$  МВт;

– температура наружного воздуха (в самый жаркий период года)  $T_{air} = 33,5$ °C;

– относительная влажность воздуха  $\varphi = 60\%$ .

Определим для математической модели

калибруемые параметры путем минимизации расхождения между расчетными и измеренными значениями выходных переменных модели, используя метод Эйлера.

При расчете коэффициент массопередачи для чистой градирни  $(\beta_x, \alpha)_0$ , характеризующий эффективность тепломассообмена в чистом оросителе, выберем диапазон калибровки от 0,5 до 10 кг/(м<sup>3</sup> с).

Коэффициент калибруется таким образом, чтобы при заданных режимных параметрах ( $T_{air} = 25$  °C,  $\varphi = 60$  %,  $G_w = 148000$  т/ч,  $Q_k = 2000$  МВт) расчетная температура  $T_{out}$  совпадала с измеренным значением 31 °C (весенний режим работы АЭС). В результате получили  $(\beta_x, \alpha)_0 = 8$  кг/(м<sup>3</sup> с).

Расчет выполнялся послойно, для определения калибруемых параметров использовалась расчетная тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/50 в режиме максимальных электрических нагрузок, рисунок 2.

Непосредственное соединение выхода блока «Конденсатор» со входом блока «Градирня», а его выхода – со входом «Конденсатор» привело к возникновению классической проблемы алгебраической петли (Algebraic Loop). SimInTech диагностировал эту ошибку, так как для расчета по уравнению (1) в момент времени  $t$  требуется значение, которое, в свою очередь, зависит от  $(t)$ . Это создает циклическую мгновенную зависимость, неразрешимую решателем без дополнительной информации [6]. Для устранения этой проблемы в разрыв сигнальной линии был использован динамический блок «Задержка» (Unit Delay). Данный блок разрывает мгновенную связь, выдавая на выходе в момент времени  $t$  значение своего входа, задержанное на один шаг интегрирования  $(t-dt)$ , что является физически корректным (учет времени переноса воды) и математически разрешимым для решателя<sup>2</sup>. Начальное условие для блока задержки было задано равным расчетной температуре воды в начальный момент моделирования.

<sup>2</sup> Официальная документация SimInTech. Комплекс динамического моделирования SimInTech. Руководство пользователя. 2024. Режим доступа: <https://simintech.ru/support/> (дата обращения: 26.01.2026).

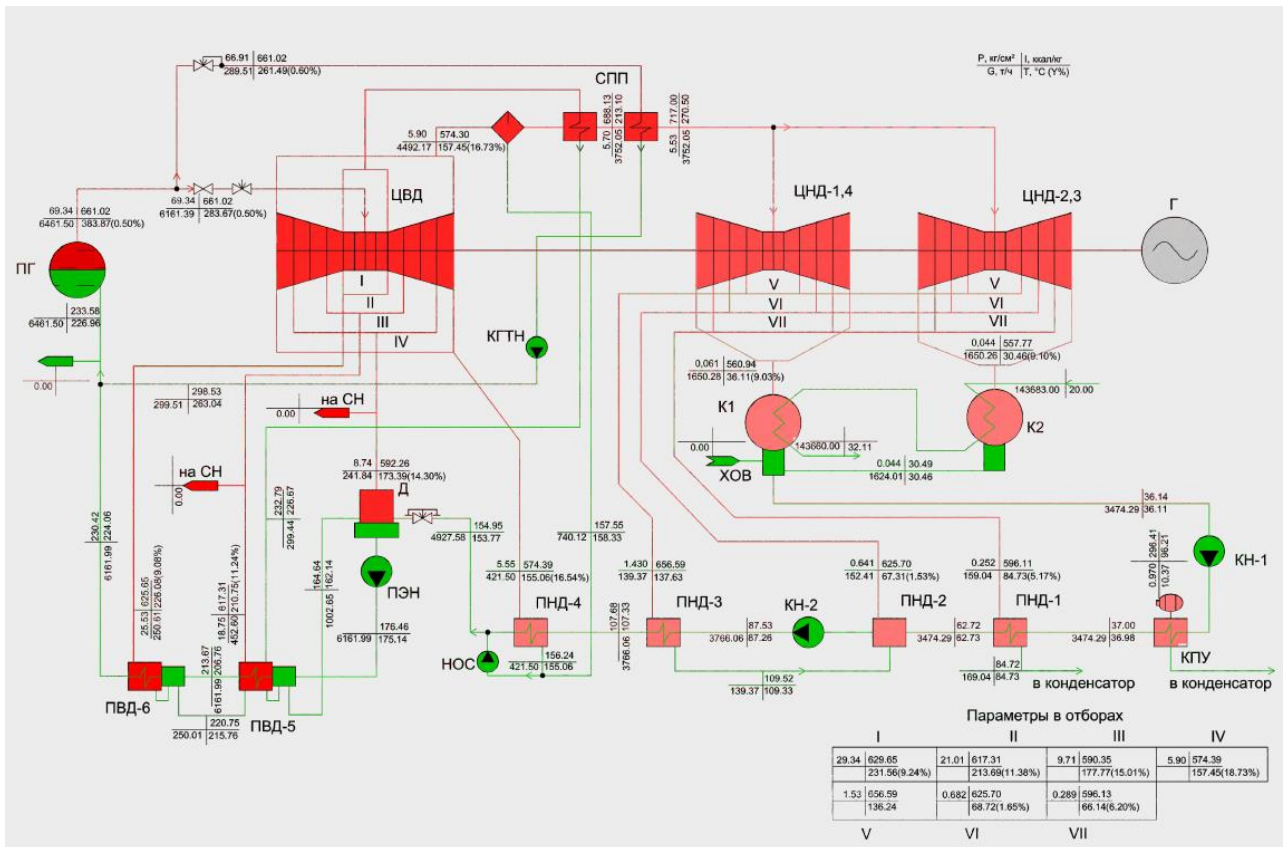


Рисунок 2. Тепловая схема К-1200-6,8/50 в режиме максимальной электрической нагрузки  
 Figure 2. Thermal circuit K-1200-6,8/50 in the maximum electrical load mode

Итоговый вид математической модели изображен на рисунке 3, в нем последовательно соединены основные структурные блоки: константы, блоки расчетного кода

с использованием внутреннего языка программирования SimInTech, вывод расчетов на графики функций.

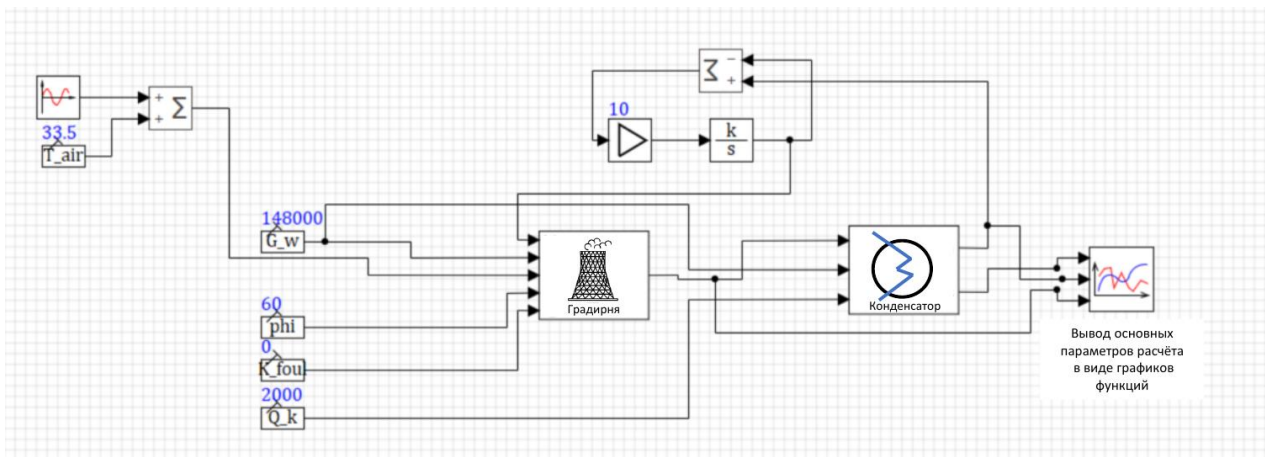
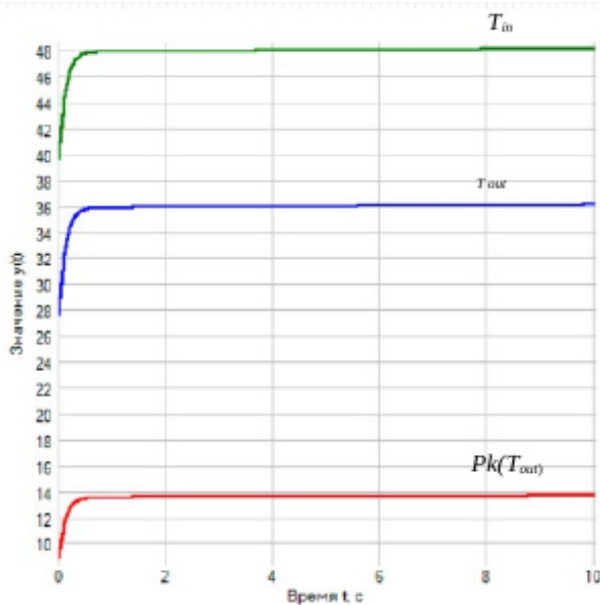


Рисунок 3. Математическая модель расчета влияния давления в конденсаторе от температуры окружающей среды установившегося режима

Figure 3. Mathematical model of calculating the effect of pressure in a condenser on the ambient temperature of a steady state

## Результаты и обсуждение

В результате проведения серии математических вычислений при помощи имитационного математического моделирования в качестве результатов расчета были получены следующие графики функций, изображенные на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Зависимость влияния давления в конденсаторе от температуры охлаждающей воды

**Figure 4.** Dependence of the pressure in the condenser on the cooling water temperature

С ростом температуры наружного воздуха в самый жаркий период года увеличивается температура охлажденной воды на выходе из градирни до  $36^{\circ}\text{C}$ , что вызывает изменение давления в конденсаторе – с 9,5 до 13,5 кПа и превышает допустимый предел эксплуатации турбины (12 кПа). При достижении  $P_k = 12$  кПа для поддержания вакуума в допустимых пределах требуется снижать электрическую нагрузку турбоагрегата, что приводит к недовыработке электроэнергии.

Для количественной оценки степени соответствия разработанной математической модели реальным данным эксплуатации энергоблока с реактором ВВЭР-1200 проведено сравнение расчетных значений с измеренными параметрами в диапазоне режимов, характерных для весенне-летнего периода, используя проектные номограммы, а также балансовые испытания работы башенной градирни от 24.07.2023 года, представленные в таблице 1.

Также для верификации математической модели воспользуемся проектной номограммой башенной испарительной градирни, изображенной на рисунке 5.

**Таблица 1.** Эксплуатационные испытания башенной градирни энергоблока №6 Нововоронежской АЭС

**Table 1.** Operational tests of the cooling tower of power unit № 6 of Novovoronezh NPP

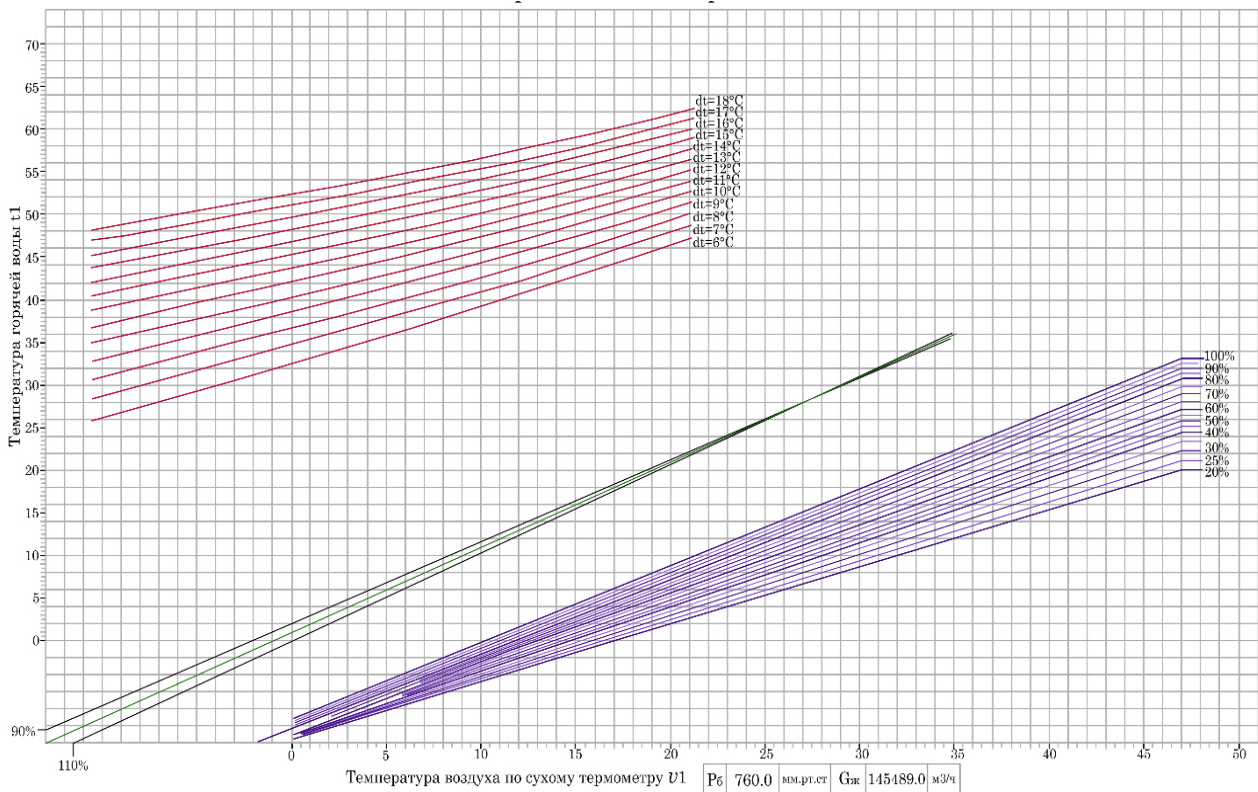
Параметры	Дата	24.07.2023			
	Время	06-00	08-00	10-00	12-00
$T_{\text{наружного воздуха}} (^{\circ}\text{C})$		15,8	19,0	21,8	24,6
Влажность воздуха (%)		87	70	55	43
$T_{\text{вх. в конденсатор}} (^{\circ}\text{C})$		34,1	34,2	34,8	35,0
$T_{\text{вых. с конденсатора}} (^{\circ}\text{C})$		45,5	45,5	46,2	46,4
$N_{\text{эл.}} \text{ МВт}$		1139,4	1134,7	1132,2	1127,4
$N_{\text{р/у.}} \text{ МВт}$		3197,3	3188,7	3199,4	3187,9
$T_{\text{х.вода по расчетной номограмме}} (^{\circ}\text{C})$		33,0	33,0	34,0	34,6
$\Delta T_{\text{вх./вых конденсатор}} (^{\circ}\text{C})$		11,4	11,3	11,4	11,3
$\Delta T_{\text{х. вода}} (^{\circ}\text{C})$		1,1	1,2	0,8	0,4

Номограмма, объединяет рабочие характеристики башенной испарительной градирни при различной влажности с учетом температур по сухому и влажному термометру. При анализе данных таблицы важно учитывать параметр  $\Delta T_{\text{х. вода}}$ , который отражает разность фактической охла-

жденной воды на выходе из градирни ( $T_{\text{вх}}$ ) и расчетной температуры охлаждающе воды ( $T_{\text{х.вода}}$ ). Модель проверена в следующих диапазонах изменения ключевых параметров: температура охлажденной воды на выходе градирни  $T_{\text{out}}$ : от 31 до  $36^{\circ}\text{C}$ ; давление в конденсаторе  $P_k$ : от 9,5 до

13,5 кПа; температура наружного воздуха  $T_{air}$ : от 25 до 30 °С. Тепловая нагрузка конденсатора и расход циркуляционной

воды соответствовали номинальным (2000 МВт и 148000 т/ч соответственно).



**Рисунок 5.** Номограмма башенной испарительной градирни  
**Figure 5.** Nomogram of the tower evaporative cooling tower

В качестве основного критерия выбрана абсолютная погрешность расчетного значения температуры  $T_{out}$  (и давления  $P_k$ ) относительно измеренного. Дополнительно рассчитана относительная погрешность для давления.

Для калибровки и верификации использованы две характерные точки эксплуатационного режима (усредненные данные за период 2023–2024 гг.): точка №1 – весенний режим работы с  $T_{out} = 31^\circ\text{C}$ ,  $P_k = 9,5$  кПа; точка №2 – летний режим работы с  $T_{out} = 36^\circ\text{C}$ ,  $P_k = 13,5$  кПа.

Промежуточные значения были получены в ходе дополнительных замеров и использованы для оценки точности модели вне точек калибровки.

В точках калибровки (весна, лето) расхождение между моделью и измеренными значениями отсутствует (погрешность равна нулю) за счет адаптации калибруемых параметров. Для независимых промежуточных значений получены следующие результаты:

средняя абсолютная погрешность расчета  $\Delta T_{out} = 0,15^\circ\text{C}$ , максимальная абсолютная погрешность  $0,3^\circ\text{C}$ . Средняя абсолютная погрешность  $\Delta P_k = 0,2$  кПа, максимальная абсолютная погрешность  $0,4$  кПа. Относительная погрешность давления: не более 4 % во всем диапазоне.

Таким образом, в диапазоне  $T_{out} = 31 \div 36^\circ\text{C}$  модель воспроизводит давление в конденсаторе с погрешностью, не превышающей  $0,4$  кПа (или 4 %), что является удовлетворительным для инженерных расчетов и позволяет использовать модель для оценки влияния температуры охлаждающей воды на вакуум в конденсаторе. За пределами указанного диапазона ( $T_{out} < 30^\circ\text{C}$  или  $> 40^\circ\text{C}$ ) точность модели не гарантируется, так как использованная линейная аппроксимация давления может давать существенные отклонения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель динамических процессов работы ба-

шенной испарительной градирни Нововоронежской АЭС с погрешностью менее 4% от абсолютного значения давления в конденсаторе описывает теплообмен в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200, может применяться для анализа эффективности системы технического водоснабжения в различных климатических условиях, позволяет количественно оценить влияние температуры окружающей среды на вакуум в конденсаторе и, следовательно, на располагаемую мощность турбоустановки. Результаты исследования могут служить основой для оптимизации режимов работы АЭС в жаркий период года и обоснования мероприятий по борьбе с отложениями.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что использование платформы SimInTech позволяет эффективно моделировать сложные процессы, возникающие в рамках проектирования

и эксплуатации АЭС, что способствует более глубокому пониманию динамики систем и повышению надежности проектных решений.

Результаты имитационного моделирования подтвердили возможность оптимизации процессов, связанных с управлением и безопасностью АЭС, а также выявили ключевые факторы, влияющие на их эффективность. Кроме того, разработанные модели могут служить основой для дальнейших исследований и практических приложений, направленных на улучшение проектирования и эксплуатации атомных объектов.

С учетом кинетики образования отложений (коэффициента загрязнения) модель позволит прогнозировать долговременную деградацию охлаждающей способности градирни и планировать объем ремонтных работ. Данный фактор является предметом дальнейших исследований и развития модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Поваров В.П., Стацура Д.Б., Усачев Д.Е. Опыт эксплуатации и пути повышения эффективности работы системы технического водоснабжения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020;(2):5-16. <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.01>
1. Povarov V.P., Statsura D.B., Usachev D.E. Operating experience and ways to improve the efficiency of the technical water supply system of power units No. 1, 2 of the Novovoronezh AES-2. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020;(2):5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.01>
2. Малинина Т.В., Чишко С.Д. Сравнительная оценка эффективности АЭС и КЭС в электроэнергетике. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2017;10(1):80-89. Режим доступа: [https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07\\_malinina\\_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880](https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07_malinina_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880) (дата обращения: 13.01.2026).
2. Malinina T.V., Chishko S.D. Comparative assessment of NPP and IES efficiency in the electric power industry. *Scientific and technical statements of St. Petersburg State Pedagogical University*. 2017;10(1):80-89. (In Russ.). Available at: [https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07\\_malinina\\_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880](https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07_malinina_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880) (accessed: 13.01.2026).
3. Ростунцова И.А., Шевченко Н.Ю. Оценка эффективности схем модернизации системы технического водоснабжения АЭС. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015;9:612-617. Режим доступа: <https://applied-research.ru/article/view?id=7557&ysclid=mowriyhybs26704563> (дата обращения: 13.01.2026).
3. Rostuntsova I.A., Shevchenko N.Yu. Assessment of efficiency of NPP technical water supply system modernization schemes. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2015;9:612-617. (In Russ.). Available at: <https://applied-research.ru/article/view?id=7557&ysclid=mowriyhybs26704563> (accessed: 13.01.2026).
4. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 481 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610) (дата обращения: 14.01.2026).
4. Trukhniy A.D. Stationary steam turbines. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 481 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610) (accessed: 14.01.2026).
5. Поваров В.П., Безручко О.Л., Гусев И.Н., Усачев Д.Е. Паротурбинная установка К-1200-6,8/50. Воронеж: Диамат, 2021. 499 с. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/handle/123456789/36829> (дата обращения: 23.01.2026).
5. Povarov V.P., Bezruchko O.L., Gusev I.N., Usachev D.E. Steam turbine plant K-1200-6.8/50. Voronezh: Diamat, 2021. 499 p. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/handle/123456789/36829> (accessed: 23.01.2026).

6. Жмудь В. А. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления. *Автоматика и программная инженерия*. 2016;2(16):47-61. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-oshibki-pri-optimizatsii-regulyatorov-dlya-zamknutyh-sistem-upravleniya/viewer> (дата обращения: 23.01.2026).

Zhmud V.A. The main errors in optimizing regulators for closed control systems. *Automation and software engineering*. 2016;2(16):47-61. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-oshibki-pri-optimizatsii-regulyatorov-dlya-zamknutyh-sistem-upravleniya/viewer> (accessed: 23.01.2026).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Башкиров Г.А.** – разработка программного решения в виде математической модели;

**Данилов А.Д.** – формулировка идеи, выявление проблемы для исследования, разработка программного решения;

**Карандеева Н.В.** – обработка результатов исследования, разработка методологии.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Bashkirov G.A.** - development of a software solution in the form of a mathematical model;

**Danilov A.D.** – formulation of the idea, identification of a problem for research, development of a software solution;

**Karandeeva N.V.** – processing of research results, development of methodology.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

#### FUNDING:

There is no external funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Георгий Алексеевич Башкиров**, аспирант Воронежского Государственного Технического Университета г. Воронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: bashkirovga@oiate.ru

**Александр Дмитриевич Данилов**, доктор технических наук, профессор Воронежского Государственного Технического Университета, г. Воронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Наталья Владимировна Карандеева**, ведущий инженер по эксплуатации оборудования химического цеха, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Georgy A. Bashkirov**, postgraduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: bashkirovga@oiate.ru

**Alexander V. Danilov**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Natalya V. Karandeeva**, senior engineer of the chemical department equipment operation, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 31.01.2026

После доработки / Revision 12.04.2026

Принята к публикации / Accepted 16.04.2026